

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В ЮГО-ЗАПАДНЫХ ОБЛАСТЯХ УКРАИНЫ**

*Рассмотрен метод расчета суммарной солнечной радиации, позволяющий получать значения всех радиационных потоков по данным сетевых метеорологических наблюдений. Построены карты пространственного распределения месячных сумм суммарной радиации для Одесской, Херсонской и Николаевской области. Найдены среднемесячные значения углов наклона приемных поверхностей, на которые поступает наибольшее количество солнечной радиации. Информация необходима при установке и эксплуатации различных гелиоэнергетических устройств.*

**Ключевые слова:** солнечная энергия, солнечная радиация, оптимальные углы наклона приемных поверхностей, гелиоустановки.

**Постановка проблемы.** Дефицит энергии и ограниченность топливных ресурсов заставляют многие страны переходить на разработку и использование альтернативных источников энергии. Одним из вариантов решения этой проблемы является использование солнечной энергии. Созданы и создаются устройства, использующие солнечную энергию, например, такие как: зарядные устройства, водонагреватели и автономные фотоэлектрические системы (ФЭС) различной мощности, применяемые для электроснабжения производственных и жилых объектов.

Дальнейшее развитие гелиоэнергетики требует информации о статистических закономерностях временного и пространственного распределения потоков солнечной радиации, так как использование солнечной энергетики будет оправданным, если предварительно выполнены оценки фактических энергетических потоков солнечного излучения в районе предполагаемой установки ФЭС.

В работе представлен метод расчета суммарной солнечной радиации по данным метеорологических наблюдений, выполняемых в синоптические сроки наблюдения. Использование массовой метеорологической информации позволяет глубже и шире изучать пространственное и временное распределение солнечной радиации [1], так как непосредственных актинометрических наблюдений крайне мало, особенно в юго-западных областях Украины. Предложенный метод позволяет рассчитывать средние значения суммарной солнечной радиации для часовых временных интервалов с учетом постоянно изменяющихся погодных условий [2].

**Формулировка целей статьи.** Целью работы является исследование статистических закономерностей временного и пространственного распределения фактических потоков солнечной радиации и нахождение оптимальных углов наклона и экспозиции приемных поверхностей систем ФЭС, а также сравнение полученных результатов с данными климатических справочников.

**Материалы и методы исследований.** В работе использованы данные метеорологических наблюдений в сроки 6,00; 9,00; 12,00; 15,00; 18,00 истинного солнечного времени по 17 станциям Одесской, Николаевской и Херсонской областей за 1996-2000 гг.

Солнечная радиация зависит от множества факторов. К ним относятся астрономические и метеорологические факторы такие как: широта места, высота Солнца, влажность воздуха, метеорологическая дальность видимости, прозрачность атмосферы, количество и форма облачности, характер загрязнения атмосферы, а также угол наклона и азимута приемных поверхностей.

Поток суммарной радиации, поступающей на поверхность различного наклона и ориентации  $f_\alpha$ , представляет собой сумму прямой  $S$  и рассеянной радиации  $D$ , а с учетом поправок на оптическую массу атмосферы  $m_a$ , прозрачность атмосферы  $C$ , парциальное давление водяного пара (фактор мутности) в атмосфере  $f_e$ , облачность  $f_{обл}$  суммарная радиация рассчитывается следующим образом

$$Q = (S + D) \cdot f_{обл}, \quad (1)$$

здесь прямая солнечная радиация  $S_0$  на перпендикулярную поверхность определена формулой Кастрова

$$S = S_0 f_\alpha f_e = \left( \frac{I_0 \cdot \varepsilon}{1 + C \cdot m_a} \right) f_\alpha f_e, \quad (2)$$

а рассеянная радиация  $D$  формулой Сивкова

$$D = 0,38 \cdot C \cdot S_0 \cdot f_e \cdot f_D. \quad (3)$$

В формулах (1), (2) и (3) приняты следующие обозначения:  $I_0 = 1368$  Вт/м.кв – солнечная постоянная;  $C$  – прозрачность атмосферы;  $m_a$  – оптическая масса атмосферы;  $\varepsilon$  – эксцентриситет орбиты.

Эксцентриситет зависит от среднего угла орбиты  $\theta_0$  и календарного дня года  $J$

$$\varepsilon = 1,000110 + 0,034221 \cos \theta_0 + 0,001280 \sin \theta_0 + 0,000719 \cos 2\theta_0 + 0,000077 \sin 2\theta_0,$$

где  $\theta_0 = 2\pi \cdot J / 365$ .

Оптическая масса атмосферы  $m_a$  находится из соотношений

$$m_a = \begin{cases} \frac{1}{\sin h_\odot} & \text{при } h_\odot > 7^\circ \\ 42,35(h_\odot^\circ + 1)^{-0,795} & \text{при } h_\odot \leq 7^\circ \end{cases}. \quad (4)$$

В состав формулы (2) входит функция ( $f_\alpha$ ), учитывающая наклон и ориентацию поверхности, определяемая формулой

$$f_\alpha = [\sin h_\odot \cdot \cos \alpha + \cos(A_\odot - A_\Pi) \cdot \cos h_\odot \cdot \sin \alpha], \quad (5)$$

где  $h_\odot$  – высота Солнца;  $\alpha$  – угол наклона поверхности к горизонту;  $A_\odot$  и  $A_\Pi$  – азимуты Солнца в срок наблюдения и приемной поверхности соответственно.

Коэффициент прозрачности  $C$ , есть функция метеорологической горизонтальной дальности видимости  $L$  (в км), которая определена эмпирическим соотношением вида:

$$C = -0,0014 \cdot L + 0,7. \quad (6)$$

В формулы (1), (2) и (3) включены функции  $f_{обл}, f_D, f_e$ . Функция облачности

$$f_{обл} = 1 - a \Delta N - b N_{ниж} \quad (7)$$

учитывает зависимость суммарной радиации от количества облачности нижнего яруса  $N_{ниж}$  и разности баллов нижней и общей облачности  $\Delta N = N_{общ} - N_{ниж}$ . Эмпирические коэффициенты  $a$  и  $b$  для южных областей Украины приняты равными 0,075 и 0,041 соответственно.

Функция  $f_D$  учитывает долю небосвода, с которого рассеянная радиация поступает на поверхность различного наклона  $\alpha$  и ориентации  $A_{п}$

$$f_D = \sqrt{\sin(90 - \alpha)} \quad (f_D = 0,5 \text{ если } \alpha \geq 75^\circ) \quad (8)$$

Функция  $f_e$  в формулах (2) и (3) определяет зависимость прямой и рассеянной радиации от парциального давления водяного пара в атмосфере:

$$f_e = A \cdot \exp\left(\frac{m \pm T}{0,9m + 9,4}\right), \quad (9)$$

$$T = 2 + 0,085 \cdot e,$$

где  $T$  – фактор мутности, который при чистой и сухой атмосфере равен 2,  $e$  (гПа) – парциального давления водяного пара. Знак плюс в формуле (9) соответствует рассеянной радиации, знак минус – прямой, так как влияние влагосодержания атмосферы противоположно для прямой и рассеянной радиации. Эмпирический коэффициент  $A$  равен 0,93 для прямой и 1,22 – для рассеянной радиации. Увеличение парциального давления пара ведет к росту рассеянной и уменьшению прямой радиации.

Окончательно поток суммарной радиации на наклонные поверхности различной ориентации с учетом всех поправок оценивается по следующей формуле

$$Q = [S_0 f_\alpha f_e + 0.38 \cdot C \cdot S_0 f_D f_e] f_{обл} \quad (10)$$

Для расчета суточных интегральных сумм суммарной радиации используются формулы, учитывающие время восхода и захода Солнца. Если восход до 6 часов, то используется формула

$$\sum Q = 3600 \cdot [0,5(Q_6 \cdot \Delta t_1 + Q_{18} \cdot \Delta t_2) + 1,5((Q_6 + Q_{18}) + 2(Q_9 + Q_{12} + Q_{15}))]; \quad (11)$$

$$\Delta t_1 = 6 - t_{восх}, \quad \Delta t_2 = t_{закат} - 18,$$

если после 6 часов, то

$$\sum Q = 3600 \cdot [0,5(Q_9 \cdot \Delta t_1 + Q_{15} \cdot \Delta t_2) + 1,5(Q_9 + Q_{15} + 2 \cdot Q_{12})]; \quad (12)$$

$$\Delta t_3 = 9 - t_{восх}, \quad \Delta t_4 = t_{закат} - 15,$$

где  $Q_6, Q_9, Q_{12}, Q_{15}$  и  $Q_{18}$  – значения суммарной радиации за стандартные сроки метеорологических наблюдений 6,00; 9,00; 12,00; 15,00; и 18,00 часов, а  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$  и  $\Delta t_4$  – разница во времени между сроками измерений и временем восхода  $t_{\text{восх}}$  и заката Солнца  $t_{\text{закат}}$ .

**Результаты исследований и их анализ.** Используя представленный выше метод, были рассчитаны потоки прямой, рассеянной и суммарной радиации по данным метеорологических наблюдений 17-ти метеостанций Одесской, Николаевской и Херсонской областей. Расположение метеорологических станций представлено на рис. 1.

Суточные и месячные суммы потоков суммарной радиации на горизонтальную поверхность осредненные далее за пятилетний период показаны на рис. 2.

Пространственное распределение суммарной радиации в юго-западных областях Украины обладает двумя характерными режимами. Первый наблюдается в летне-осенний сезон года (июнь и сентябрь), а второй в зимне-весенний период (январь и март). В летне-осенний период присутствует пространственная периодичность смены минимумов и максимумов радиации, которая видна в виде смены ложбин и гребней в поле изолиний суммарной радиации. В зимне-весенний период поле суммарной радиации квазиоднородно и не имеет ярко выраженных центров.

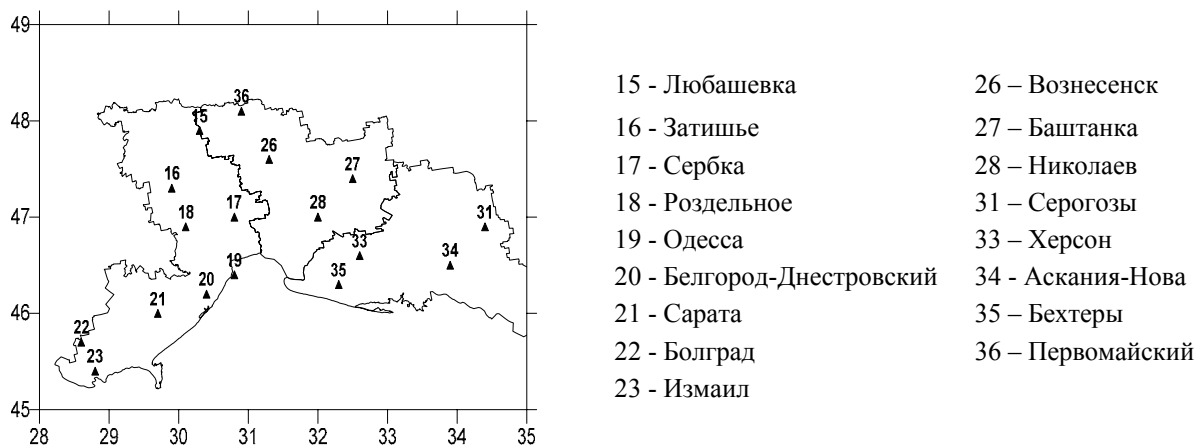


Рис.1 – Карта-схема расположения станций.

Сезонные особенности конфигурации пространственных полей радиационных потоков зависят, очевидно, от различий в масштабах облакообразующих процессов. Летне-осеннему сезону присуща мезомасштабность (конвективность) процесса облакообразования, а зимне-весеннему сезону макромасштабность, которая связана с циклонической циркуляцией.

В июне на территории юго-западной части Украины месячная сумма суммарной радиации достигает максимального значения  $818 \text{ МДж/м}^2$ , а в декабре  $204 \text{ МДж/м}^2$ .

В табл. 1 представлены результаты расчетов суточных  $Q_{\text{сут}}$  и месячных  $Q_{\text{мес}}$  сумм потоков суммарной радиации поступающей на горизонтальную поверхность. Здесь же показаны данные справочников по климату СССР [3], [4], [6] а также научно-исследовательского отчета Одесского государственного экологического университета «Кліматичні ресурси Одеської області для цілей сталого розвитку регіону» [5].

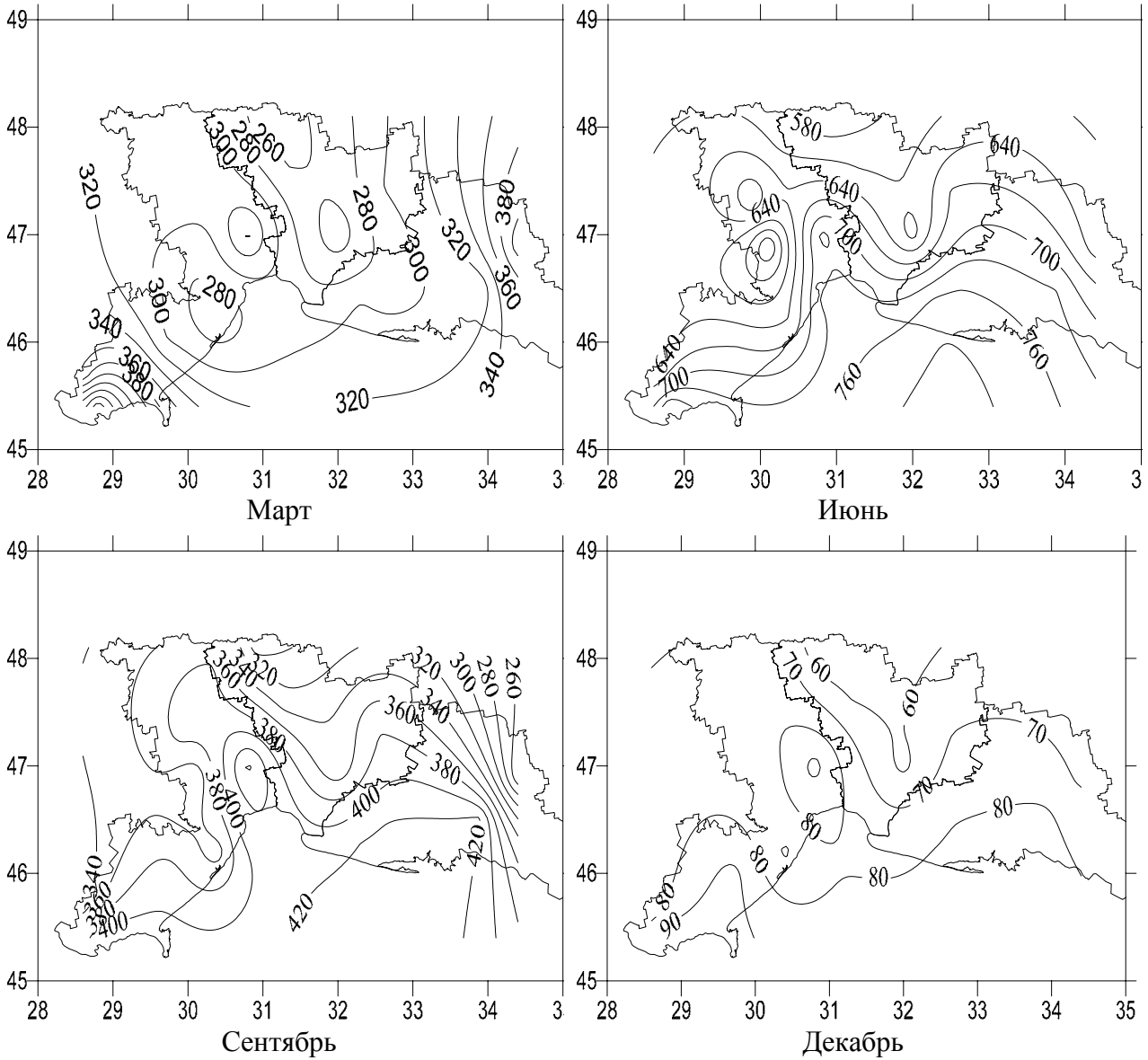


Рис.2 – Пространственно-временное распределение месячных сумм суммарной радиации ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ ) для центральных месяцев сезонов.

Сравнительный анализ показал, что по своим значениям расчетные суммы суммарной радиации ближе всего к данным из «Научно-прикладного справочника по климату СССР» [3] и справочника «Строительные нормы проектирования СССР» [6], так в эти справочники включены только результаты актинометрических наблюдений. Учитывая, что наши данные получены по фактическим метеорологическим наблюдениям без климатических осреднений количества облачности и иных метеорологических величин, расчетные суточных  $Q_{\text{сут}}$  и месячных  $Q_{\text{мес}}$  суммы суммарной радиации хорошо согласуются с непосредственно измеренными радиационными потоками.

Анализ распределения суммарной радиации на наклонные поверхности различной экспозиции показан на рис. 3. По мере увеличения наклона поверхности максимум радиации смещается в сторону южной ориентации поверхности.

Таблица 1 – Сравнение расчетных и климатических данных значений суммарной радиации (МДж/м<sup>2</sup>), Одесса

Суммарная радиация	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	Расчетные данные											
$Q_{сут}$	2,5	5,3	8,5	15,1	20,7	24,2	23,8	19,8	12,6	6,9	5,9	2,2
$Q_{мес}$	74	149	256	452	643	727	738	616	376	215	123	70
	Научно-прикладного справочника по климату СССР [3]											
$Q_{сут}$	3,7	5,7	9,9	15,5	20,3	23,3	22,9	20	15,1	9,1	3,9	2,9
$Q_{мес}$	114	160	306	465	631	698	712	623	452	282	118	89
	Справочник по климату СССР [4]											
$Q_{сут}$	2,8	4,0	8,1	12,1	16,1	17,3	18,1	15,3	11,2	6,8	3,0	2,4
$Q_{мес}$	88	143	261	402	519	579	585	497	377	217	101	75
	Отчет «Кліматичні ресурси Одеської області» [5]											
$Q_{мес}$	109	154	271	440	580	693	663	607	414	255	122	80
	«Строительные нормы проектирования СНИП СССР» [6]											
$Q_{мес}$	107	159	310	480	647	699	718	616	446	270	113	84

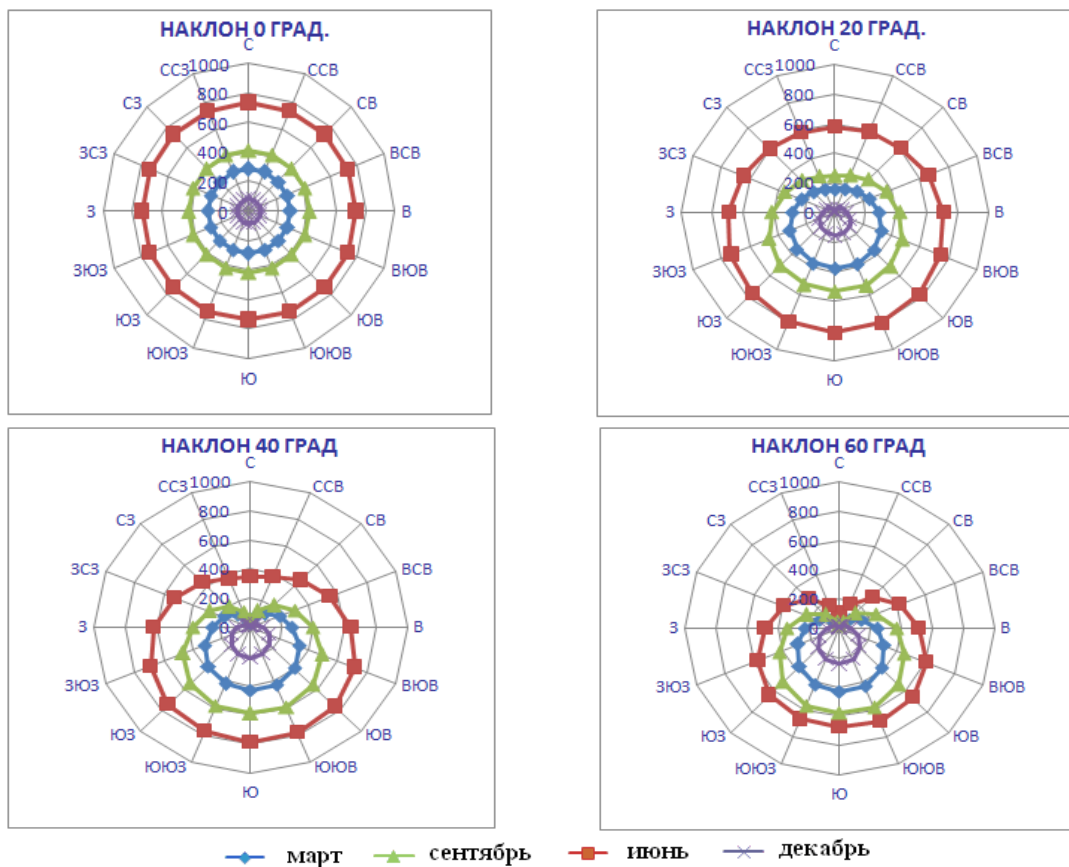


Рис.3 – Распределение месячных сумм суммарной радиации (МДж/м<sup>2</sup>) при различных углах наклона и ориентации приемной поверхности для центральных месяцев сезонов, Одесса.

Месячные суммы радиации для поверхностей ориентированных на юг зависят от углов наклона приемных поверхностей [7]. На рис. 4 видны изменения  $Q_{\text{мес}}$  в Одессе в центральные месяцы сезонов.

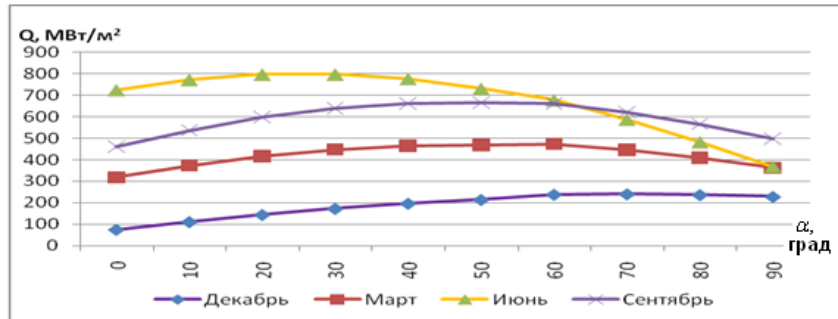


Рис.4 – Месячные суммы суммарной радиации, Одесса (1996-2000 гг.).

Из рис.4 видно, что максимальные значения  $Q_{\text{мес}}$  наблюдаются в июне, если приемная поверхность имеет наклон 20-25 градусов. В декабре наибольшее потоки  $Q_{\text{мес}}$  можно получить на поверхности, которые имеют наклон 60-70 градусов. В марте и сентябре максимум солнечной радиации наблюдается при углах наклона примерно 50 градусов. При равных углах наклона значения суммарной радиации в сентябре выше, чем в марте, что определяется большей вероятностью малооблачной погоды.

Для прикладного использования рассчитаны точные значения оптимального угла наклона приемных поверхностей для городов расположенных на различных широтах. В табл. 2 показаны среднемесячные оптимальные углы наклона с учетом климатических особенностей местности. Угол наклона приемных поверхностей ФЭС, на которые поступает максимальный поток солнечного излучения, приблизительно равен разнице между прямым углом (90 градусов) и высотой Солнца в полдень.

Таблица 2 – Среднемесячные оптимальные углы наклона (α,град) приемных поверхностей

Станция, широта места	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Болград, φ=45,7	67	60	49	37	29	25	29	34	45	57	66	70
Одесса, φ =46,4	68	61	50	38	30	26	27	33	46	58	66	71
Сербка, φ =47,0	69	63	51	38	30	26	28	35	47	59	67	72
Любашовка, φ =47,9	70	63	51	39	30	26	28	36	47	60	68	73

В табл. 3 приведены месячные суммы суммарной радиации, поступающие на горизонтальную поверхность ( $Q_{\text{мес.гор.}}$ ), на поверхность с наклоном 25 градусов ( $Q_{\text{мес.рек.}}$ ) и на поверхность, угол наклона которой корректируется ежемесячно ( $Q_{\text{мес.опт.}}$ ).

Таблица 3 – Месячные суммы суммарной радиации (МДж/м<sup>2</sup>) на поверхности различного наклона  $Q_{\text{мес гор.}}$ ,  $Q_{\text{мес опт.}}$ ,  $Q_{\text{мес рек.}}$  при ориентации поверхности на юг

Станции	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Болград, $\varphi=45,7$											
$Q_{\text{мес гор.}}$	80	163	282	397	539	623	568	525	322	208	93	72
$Q_{\text{мес опт.}}$	205	321	427	492	613	687	648	627	449	374	224	211
$Q_{\text{мес рек.}}$	152	263	390	482	612	687	646	620	423	319	169	148
	Одесса, $\varphi=46,4$											
$Q_{\text{мес гор.}}$	74	149	256	452	643	728	738	616	376	215	176	70
$Q_{\text{мес опт.}}$	196	299	388	558	731	803	827	744	535	399	347	215
$Q_{\text{мес рек.}}$	144	244	354	548	730	803	827	734	501	336	285	149
	Сербка, $\varphi=47,0$											
$Q_{\text{мес гор.}}$	108	159	344	519	711	738	767	625	445	236	117	93
$Q_{\text{мес опт.}}$	300	362	540	657	816	819	864	761	646	452	300	301
$Q_{\text{мес рек.}}$	216	281	487	640	813	819	863	749	600	376	222	205
	Любашевка, $\varphi=47,9$											
$Q_{\text{мес гор.}}$	98	182	311	363	455	591	688	599	385	241	98	78
$Q_{\text{мес опт.}}$	287	394	495	464	523	658	778	734	565	472	261	263
$Q_{\text{мес рек.}}$	202	312	444	451	521	658	777	722	523	390	190	176
	Первомайск, $\varphi=48,1$											
$Q_{\text{мес гор.}}$	63	107	250	370	508	557	545	456	293	144	69	51
$Q_{\text{мес опт.}}$	173	227	379	460	579	614	610	547	410	267	175	159
$Q_{\text{мес рек.}}$	124	181	345	449	577	614	610	540	385	224	130	109

Из таблицы видно, что максимальные потоки суммарной радиации наблюдаются при оптимальных углах наклона, а наименьшие потоки наблюдаются на горизонтальной поверхности. Годовые суммы суммарной радиации на поверхности с регулируемым углом наклона выше на 7-10% по сравнению с поверхностями, имеющих постоянный угол в 25 градусов. Например, годовой прирост радиации для Одессы и Болграда составляет 7,5%, для Сербки – 8,7% , для Любашевки – 9,8% и 7,2% для Первомайска.

**Выводы.** Предложенный метод позволяет рассчитывать средние значения суммарной солнечной радиации для часовых интервалов с учетом изменяющихся погодных условий.



Метод реализован в виде программного продукта на алгоритмическом языке C++. В качестве входной информации используется только массовая метеорологическая информация.

С помощью предложенного метода найдены оптимальные углы наклона и ориентации поверхностей, на которые поступают максимальные месячные суммы суммарной радиации.

Так как актинометрических станций в юго-западном регионе Украины всего две, а в климатических справочниках имеется только информация о среднемесячных или среднегодовых потоках солнечного излучения, то предложенный метод позволяет иметь фактическую информацию, необходимую при установке и эксплуатации различных гелиоэнергетических устройств.

### Список литературы

1. Волошин В.Г. Метод расчета турбулентных потоков и температуры подстилающей поверхности на основе метеорологических наблюдений //Метеорология, климатология и гидрология, 2002. Вып.46. – С. 83-89.
2. Степаненко С.Н., Волошин В.Г., Гончаренко Н.Н., Попович П.П. Определение характера стратификации приземного слоя атмосферы для оценки метеорологического потенциала загрязнения воздуха. //Метеорология, климатология и гидрология, 2005. Вып.49. – С.27-39.
3. Научно-прикладной справочник по климату СССР, серия 3, часть 1-6. Вып. 10. – Л: Гидрометеиздат, 1990. – 605 с.
4. Справочник по климату СССР. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Вып.10. – Л: Гидрометеиздат, 1966. – 124 с.
5. Отчет кафедры физики атмосферы ОГЭКУ по научно-исследовательской работе «Кліматичні ресурси Одеської області для цілей сталого розвитку регіону».– Одесса.: 2009 г.
6. «Строительные нормы проектирования СНиЛ СССР». – Л: Гидрометеиздат, 1982.
7. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей. – Л: Гидрометеиздат, 1978. – 215 с.

#### **Просторово-часовий розподіл сумарної сонячної радіації в південно-західній частині. України.**

**Волошина О.В., Курьшина В.Ю.**

*В статті розглянуто метод розрахунку сумарної сонячної радіації, що дозволяє отримувати значення всіх радіаційних потоків за даними стандартних метеорологічних спостережень. Побудовано карти просторово-часового розподілу місячних сум сумарної радіації для Одеської, Херсонської і Миколаївської області і знайдено середньомісячні значення оптимальних кутів нахилу приймальних поверхонь, на які надходить найбільша кількість сонячної радіації. Інформація є необхідною при впровадженні і експлуатації різноманітних геліоенергетичних приладів.*

**Ключові слова:** сонячна енергія, сонячна радіація, оптимальні кути нахилу приймальних поверхонь, геліоустановки.

#### **Space -temporal distribution of total solar radiation in south-west part of the Ukraine.**

**Voloshina O.V., Kuryshina V.Yu.**

*In the paper method of computation of the total solar radiation is discussed. The method allows obtaining the term, daily and monthly values on the base of standard meteorological observation data. The maps of the space-temporal distribution of monthly sums of total radiation are plotted for Odesa, Kherson and Mykolayiv districts, and the monthly values of inclination angles of receiving surfaces, on which most of solar radiation are collected, are revealed. It is necessary to implement alternative energy sources, using solar energy.*

**Keywords:** solar energy, solar radiation, optimum angles of inclination of receiving surfaces, helioequipment.